

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)	

三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量估算

牛凤霞¹, 肖尚斌^{1*}, 王雨春^{2*}, 刘德富¹, 黎国有¹, 王亮¹, 纪道斌¹, 杨正健¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 2010年11月~12月在三峡水库开展了沉积物内源负荷调查, 对云阳等6个长江干流点和9条支流河口的沉积物-水界面正磷酸盐含量($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)进行了分析. 结果表明, 支流上覆水和孔隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量略高于干流, 其中支流孔隙水中的含量为 $9.59 \sim 29.79 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 干流孔隙水中的含量为 $9.01 \sim 25.36 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 根据Fick第一定律公式得到郭家坝和小江河口为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的“汇”, 释放通量分别为 $-0.63 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $-0.60 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 其它区域的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 都是由孔隙水向上覆水进行扩散, 释放通量的范围为 $0.15 \sim 2.47 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 假设分子扩散是沉积物营养元素迁移的主要途径, 库区水体混合均匀, 估算出沉积物孔隙水营养元素在沉积物-水界面的扩散迁移对上覆水体的影响程度较小, 仅有 $-0.011\% \sim 0.098\%$. 目前三峡水库沉积物作为内源, 释磷作用还未对水质产生较大影响, 但不排除水库外部污染源得到控制后, 三峡库区沉积物内源营养负荷的潜在释放风险.

关键词: 沉积物-水界面; 正磷酸盐; Fick定律; 释放通量; 三峡水库

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1308-07

Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter

NIU Feng-xia¹, XIAO Shang-bin¹, WANG Yu-chun², LIU De-fu¹, LI Guo-you¹, WANG Liang¹, JI Dao-bin¹, YANG Zheng-jian¹

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Department of Water Environment, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to investigate the internal contamination load sources in the Three Gorges Reservoir (TGR), a field sampling campaign was carried out in November and December 2010. Phosphate contents ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) were determined in 6 mainstream and 9 estuary sediment cores of sediment-water interface in the TGR. The results showed that the $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations of pore water in sediments from tributaries and the corresponding overlying water were higher than those from the mainstream. The $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ contents in tributaries and mainstream ranged from $9.59\text{--}29.79 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $9.01\text{--}25.36 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Based on calculations using the Fick's First Law, sediments located at GuoJiaba and Xiaojiang estuaries were the 'sink' of P, and the fluxes of sediment $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were estimated to be $-0.63 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ and $-0.60 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, respectively. In other areas, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ diffused from the pore water to the overlying water, and the diffusive fluxes were in the range of $0.15\text{--}2.47 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$. With the assumption that molecular diffusion was the main process by which nutrients were transported from the pore water to the overlying water and the water body in the TGR was evenly mixed, the contribution of sediment phosphorus to the water body was only $-0.011\text{--}0.098\%$. So far, with the Three Gorges Reservoir sediments as the internal contamination load sources, the phosphorous release didn't significantly influence the water quality. The sediments in the TGR may be a large P source in a period of future time after the external P source is controlled efficiently.

Key words: sediment-water interface; phosphate; Fick's Law; releasing fluxes; the Three Gorges Reservoir (TGR)

2003年6月长江三峡水利枢纽工程正式下闸蓄水, 库区水体由天然河道改变为人工水库^[1]. 受水库回水顶托影响, 库区水文水环境条件发生了根本的变化, 水位上升, 流速变缓^[2], 河流输送氮、磷的能力受阻, 营养物质局部富集, 富营养化发生的可能性大大增加, 从而造成库区水环境安全隐患^[3].

沉积物是营养盐累积和再生的重要场所, 它与水体之间存在着一种吸附和释放的动态平衡, 不断地接纳水体中沉积下来的颗粒物质, 一旦环境条件改变, 营养盐可能通过扩散、对流、沉积物再悬浮

等过程释放到上覆水中, 造成二次污染. 其中, 底泥所释放的磷主要为溶解性正磷酸盐, 也是水生生物最易吸收的形式, 这样就为大型水生生物和藻类的增殖提供了条件, 加速其生长繁殖的速度^[4]. 在外

收稿日期: 2012-06-11; 修订日期: 2012-10-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-001, 2012ZX07104-001); 三峡大学研究生科研创新基金资助项目(2011CX011); 国家自然科学基金项目(51179205)

作者简介: 牛凤霞(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水工学. E-mail: nfxctguedu@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: shangbinx@163.com; wangyc@iwhr.com

源输入负荷得到控制的情况下, 沉积物向上覆水中释放氮、磷等营养盐是水体富营养化的重要原因^[5, 6]. 本研究通过在库区范围 15 个样点采集沉积物-水界面柱状样品, 测定上覆水和孔隙水中正磷酸盐含量($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), 采用孔隙水扩散模型法估算了库区干流和河口区沉积物-水界面的释放通量, 以及沉积物磷释放对水体的贡献率, 旨在为客观评价沉积物磷的潜在释放能力及其对库区水体富营养化水平贡献提供数据^[7, 8].

1 研究区域概况

三峡工程位于长江西陵峡中的湖北宜昌市三斗坪, 坝址控制流域面积 100 万 km^2 , 正常蓄水位 175 m, 总库容 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$, 回水长度 660 km, 回水末端抵达重庆主城区, 涉及湖北省及重庆市的 25 个区县.

三峡水库地理位置为东经 $106^\circ \sim 111^\circ 50'$, 北纬 $29^\circ 16' \sim 31^\circ 25'$ 之间, 主要的一级支流有 40 条, 嘉陵江和乌江是库区最大的两条支流, 另外流域面积超过 3 000 km^2 的支流有 6 条, 分别为綦江、龙溪河、小江、磨刀溪、大宁河和香溪河^[9, 10]. 库区水体 pH 值 7.17 ~ 8.69, 为中性偏弱碱性^[11], 《2011 年长江三峡工程生态与环境监测公报》发布的水环境质量监测结果显示^[11]: 2010 年, 三峡库区长江干流水质均达到或优于 III 类; 受干流回水顶托作用影响的 38 条主要支流 I ~ III 类的断面比例为 81.6% ~ 98.8%. 库区工业污染源废水排放量为 3.19 亿 t, 城镇生活污水排放量为 6.15 亿 t. 受蓄水影响, 库区支流回水区水体的富营养化程度明显重于非回水区, 香溪河、童庄河、大宁河、梅溪河、磨刀溪、汤溪河、小江、龙河等主要支流回水区均有水华现象出现.

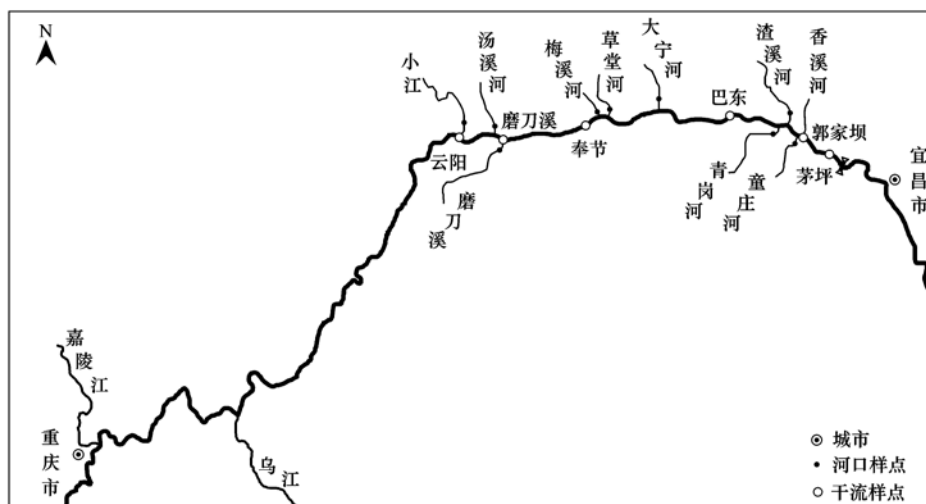


图 1 三峡库区采样点分布示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites in the Three Gorges Reservoirs

2 材料与方法

2.1 样品采集

于 2010 年 11 月 22 日 ~ 12 月 19 日, 从三峡大坝坝前茅坪断面开始, 溯流而上至重庆港采集样品. 在长江干流及河口处的 15 个断面采集沉积物-上覆水样进行分析, 采样点分布如图 1 所示. 样品采集使用柱状采样器 ($\phi 60 \text{ mm}$)^[12], 力求采样过程不扰动沉积物, 现场分层. 分层采集界面上覆水 (共采集约 10 cm, 按 2 cm 间隔进行分层), 储存于用 5% HNO_3 处理过的聚乙烯塑料瓶中; 柱状沉积物深度约为 10 ~ 25 cm, 现场按 2 cm 进行分层并分装于聚乙烯离心管中. 上覆水和沉积物样品均密封保存于 4°C 的冰箱中, 运回实验室供分析.

2.2 上覆水和沉积物样品的处理和分析

在实验室条件下对沉积物样品进行分析, 采用 L53R-1 型冷冻离心机离心 ($4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 30 min) 得到孔隙水, 泥样用铝箔包裹, 放入冷冻干燥机中干燥 3 ~ 5 d 直至恒重, 计算沉积物的含水量和孔隙度.

上覆水和孔隙水样品经孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 的玻璃纤维滤膜 (Whatman GF/C) 过滤, 并在 24 h 之内完成溶解性正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 的测定. 水样的测定在中国水利水电科学研究院水环境研究所进行, 检测仪器为 Thermo Fisher 全自动化学分析仪, 分析方法参照文献 [13].

2.3 孔隙水扩散通量模型

三峡水库属于深水水库, 扰动作用相对较小, 可以认为分子扩散是沉积物溶解组分通过孔隙水向上

覆水体迁移的最主要方式^[14]. 采用孔隙水扩散模型法估算正磷酸盐在界面上的释放通量, 孔隙水的分子扩散过程满足 Fick 第一定律^[15]:

$$J_s = -\phi D_s \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (1)$$

式中, J_s 为沉积物-水界面的释放通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; ϕ 为表层沉积物的孔隙度; $(\partial c / \partial x)_{x=0}$ 为沉积物-水界面的营养盐浓度梯度, D_s 为沉积物中溶质的分子扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

由于 D_s 包括弯曲度的影响, 在实际工作中沉积物弯曲度的测量非常困难, 所以通常是根据稀溶液中溶质的扩散系数 D_0 来推导. Ullman 等^[16] 给出的分子扩散系数 D_s 与孔隙度 ϕ 之间的经验关系式:

$$\begin{aligned} D_s &= \phi D_0 \quad (\phi < 0.7) \\ D_s &= \phi^2 D_0 \quad (\phi > 0.7) \end{aligned} \quad (2)$$

Li 等^[17] 则通过实验得出稀溶液中溶质的扩散系数 D_0 和温度 T (上覆水) 的经验公式, 进一步校准温度和孔隙度的差异造成的误差^[18].

$$D_0 (\text{HPO}_4^{2-}) = 7.34 + 0.16 (T - 25^\circ\text{C}) \quad (3)$$

3 结果与讨论

3.1 上覆水-孔隙水中磷含量分布

三峡库区干支流沉积物上覆水和孔隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量垂直分布见图 2 和图 3. 总体而言, 上覆水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量较孔隙水低, 支流河口上覆水和孔隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量略高于干流. 对于上覆水, 干流云阳、小江河口和汤溪河口 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量随深度增加有较大波动, 其它采样点 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量几乎为均匀上升状态. 对于孔隙水, 长江干流磨刀溪、奉节和巴东以及支流小江河口、磨刀溪河口和童庄河口含量变化波动较小, 浓度随深度略有上升; 其它干支流样点在表层 10 cm 内, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量随深度出现较大的跳跃式上升和下降过程. 上覆水和孔隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在垂向上的差异, 表明沉积物-水界面的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量存在较高的浓度梯度, 沉积物向上覆水有释放的趋势. 从云阳到茅坪, 干流样点上覆水和孔隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量沿程均先增大后减小, 但上覆水中含

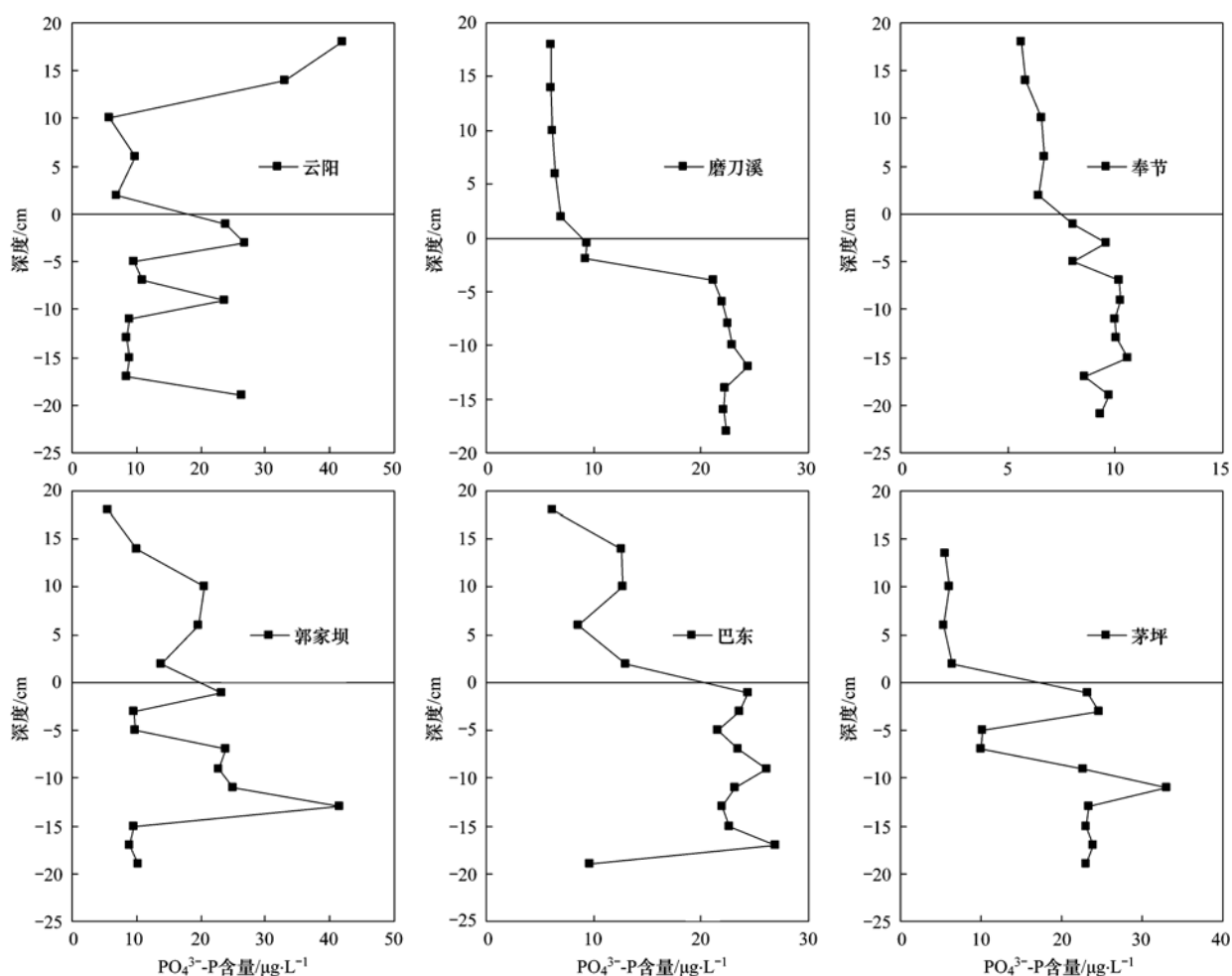


图 2 干流不同样点沉积物-水界面 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的垂直变化

Fig. 2 Vertical changes in concentrations of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at the sediment-water interfaces of mainstream sampling locations

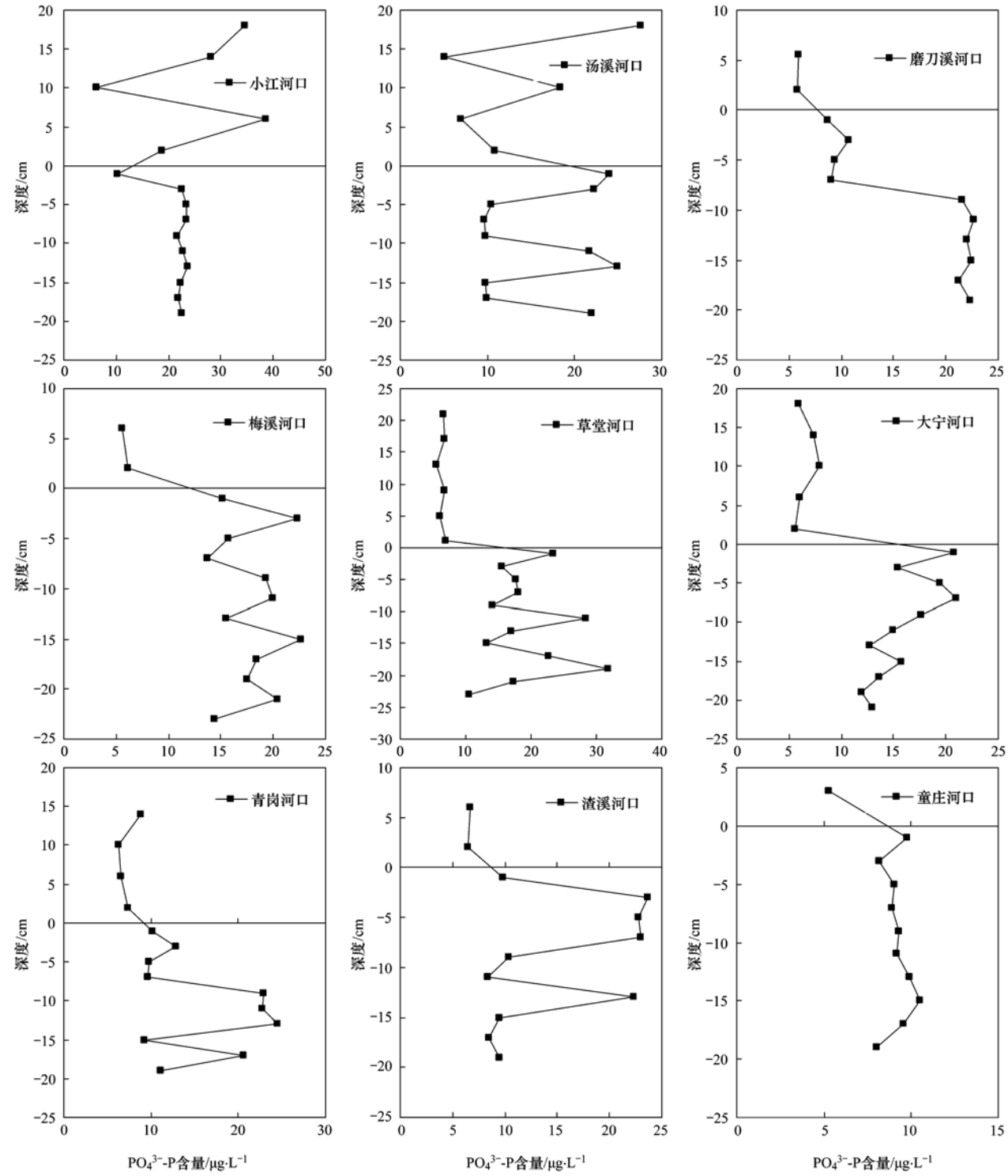


图3 支流不同样点沉积物-水界面 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的垂直变化

Fig. 3 Vertical changes in concentrations of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at the sediment-water interfaces of tributary sampling locations

量最大值出现在郭家坝, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量为 $18.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 孔隙水中含量最大值出现在奉节, 含量为 $25.36 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 比较干支流 15 个采样点的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量, 干流上覆水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量值域为 $6.23 \sim 18.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 孔隙水中的含量值域为 $9.01 \sim 25.36$

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 支流上覆水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量值域为 $5.25 \sim 25.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 孔隙水中的含量值域为 $9.59 \sim 29.79 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

3.2 孔隙水扩散模型计算的磷释放通量

离子在孔隙水中的扩散服从 Fick 第一定律, 将

孔隙水上端扰动层的 3~4 cm 以及界面向上覆水 5 cm 左右处的 PO_4^{3-} -P 含量对深度进行指数拟合 (表 1)。根据拟合所得表达式对深度 x 进行求导, 求出沉积物-水界面处的 dc/dx 。从指数拟合结果看, 15 个断面除个别采样点外, 拟合效果均较好 ($r > 0.82$)。根据实验所测定的表层沉积物 (0~4 cm) 孔隙度 ϕ , 运用 Fick 第一定律计算出相应点位的 PO_4^{3-} -P 释放通量 J_s (见表 1)。

由表 1 可见, 除干流郭家坝和支流小江河口外, PO_4^{3-} -P 均是由孔隙水向上覆水进行扩散, 即三峡库区的沉积物总体上表现为 PO_4^{3-} -P 的“源”, 释放通量的范围为 $0.15 \sim 2.47 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 最大值较最小值高出约一个数量级。进入沉积物-水界面的磷, 可能通过有机质的矿化分解、铁氧化物解吸作用、沉积物扰动等 3 种形式向水体释放^[19]。沉积物中的有机磷在一定条件下可矿化或降解为溶解型磷酸盐, 具有潜在的生物有效性^[3], 对沉积物孔隙水中正磷酸盐浓度及扩散起着重要作用。由于受沉积物中有机质氧化降解等影响, 使得沉积环境处于相对还原条件, 沉积物中的铁氧化物或氢氧化物较易溶解, 与之结合的磷酸盐也可能溶解释放^[19]。库区不同样点 PO_4^{3-} -P 的释放潜力不同, 除了受沉积物-水界面磷的浓度梯度影响, 还可能与沉积物本身的理化性质、粒径大小、比表面积等有关^[20]。库区与其他采用孔隙水扩散模型计算磷释放量的研究成果进行对比, 滇池福保湾^[5]、太湖梅梁湾、东太湖^[21]以及江苏杜塘水库^[22] PO_4^{3-} -P

的释放通量分别为 $43.07 \sim 96.73 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、 $1\,000.10 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、 $1\,627.90 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、 $244.55 \sim 474.50 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 沉积物均为营养盐释放的“源”, PO_4^{3-} -P 的释放通量远高于三峡库区, 尤其是太湖, 其释放通量是库区最大释放通量的 400 倍以上。

三峡库区沉积物释放通量较大的为云阳、巴东、茅坪以及支流的汤溪河口、梅溪河口和渣溪河口, PO_4^{3-} -P 释放通量均大于 $1.50 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。其中, 干流释放通量的最大值出现在云阳, 释放通量为 $2.02 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 最小值出现在奉节, 释放通量为 $0.15 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。从云阳到巴东, 长江干流 PO_4^{3-} -P 释放通量沿程先减小后增大, 在奉节达到最小值。这可能与库区的地貌有关, 三峡库区以奉节为界, 分为了东西两大地貌单元^[23]。支流释放通量的最大值出现在梅溪河口, 释放通量为最大值 $2.47 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 最小值出现在童庄河口, 释放通量为 $0.52 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。梅溪河、汤溪河和渣溪河等库区次级河流^[24], 水体污染较为严重, 主要超标污染物中总磷浓度普遍偏高, 对上覆水有一定的影响^[25]。郭家坝和小江河口为 PO_4^{3-} -P 的“汇”, 释放通量分别为 $-0.63 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $-0.60 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。值得注意的是, 郭家坝和小江河口上覆水中 PO_4^{3-} -P 含量较其它样点高, 分别达到 $18.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25.26 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 郭家坝上覆水中 PO_4^{3-} -P 含量的高值可能与香溪河库湾上游磷化工厂排放的工业废水造成沉积物的高磷背景值等有关。

表 1 三峡库区不同区域沉积物中 PO_4^{3-} -P 含量的拟合方程及释放通量¹⁾

Table 1 Regression equations and releasing fluxes of sediment PO_4^{3-} -P at different sampling locations of the Three Gorges Reservoir

地点	拟合曲线	相关系数 (r)	孔隙度 ϕ /%	$D_0 \times 10^6$ / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$D_s \times 10^6$ / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	J_s / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$
干流	云阳	$y = 16.8639 \exp(-0.1138x)$	0.86	69.24 ± 1.95	7.04	4.88
	磨刀溪	$y = 11.401 \exp(-0.0504x)$	0.90	79.26 ± 0.81	7.10	4.46
	奉节	$y = 7.9125 \exp(-0.0212x)$	0.95	73.70 ± 5.89	7.25	3.94
	巴东	$y = 18.033 \exp(-0.1236x)$	0.97	71.40 ± 1.48	6.97	3.55
	郭家坝	$y = 14.159 \exp(0.0465x)$	0.68	75.49 ± 0.26	7.03	4.01
	茅坪	$y = 14.397 \exp(-0.0938x)$	0.82	80.95 ± 0.07	7.06	4.63
支流	小江河口	$y = 16.639 \exp(-0.1138x)$	0.57	77.17 ± 3.06	7.07	4.21
	汤溪河口	$y = 16.352 \exp(-0.1458x)$	0.96	74.07 ± 7.87	7.09	3.89
	磨刀溪河口	$y = 8.0188 \exp(-0.0657x)$	0.91	80.43 ± 2.46	7.14	4.62
	梅溪河口	$y = 12.207 \exp(-0.162x)$	0.93	81.76 ± 0.38	7.26	4.85
	草堂河口	$y = 11.992 \exp(-0.07x)$	0.84	74.05 ± 0.80	7.27	3.99
	大宁河口	$y = 12.334 \exp(-0.056x)$	0.61	78.39 ± 2.53	7.42	4.56
	青岗河口	$y = 9.6144 \exp(-0.0736x)$	0.96	79.67 ± 1.02	7.01	4.45
	渣溪河口	$y = 11.26 \exp(-0.1196x)$	0.90	80.60 ± 1.12	7.02	4.56
	童庄河口	$y = 7.133 \exp(-0.0642x)$	0.79	79.98 ± 1.30	7.04	4.50
						0.52

1) 表中交换通量的负值表示沉积物吸收磷素, 正值则表示沉积物释放磷素

3.3 界面扩散迁移对上覆水体的贡献

假设分子扩散是沉积物营养元素迁移的主要途径^[26],库区水体混合均匀,可以估算出沉积物孔隙水营养元素在沉积物-水界面的扩散迁移对上覆水体的影响程度 a ^[27, 28].

$$a = \frac{F_D \times T_w/h}{c}$$

(4)

式中, a 为溶质扩散对上覆水体的贡献率(%) ; F_D 为溶质在水土界面上的释放通量; T_w 为库区水体的滞留时间; h 为水深; c 为上覆水中溶质的平均浓度. 根据三峡水库的水位调度情况, 本文只考虑冬季水库在 175 m 时的内源负荷特征, 滞留时间计为 3 个月, 本文估算中默认库区不同

点位水体的停留时间接近相同. 计算结果见表 2. 可以看出, 三峡库区沉积物-水界面 PO_4^{3-} -P 的扩散对上覆水体的影响较小, 只有 $-0.011\% \sim 0.098\%$. 在郭家坝和小江河口表现为“汇”, 贡献率分别为 -0.009% 和 -0.012% , 在其它区域表现为“源”, 贡献率为 $0.009\% \sim 0.150\%$. 这可能是由于三峡水库水体滞留时间较短, 水深较大, 正磷酸盐的界面扩散对上覆水体的影响较小. 东风水库和乌江渡水库的研究也有类似的结论, 沉积物是 PO_4^{3-} -P 的“源”, 冬季对上覆水体的贡献率分别为 2.8% 和 4.2%^[27]. 山仔水库冬季各点位的沉积物磷对水体营养贡献大小在 2.3% $\sim 5.7\%$ 之间^[14].

表 2 沉积物磷扩散对水体的贡献¹⁾

Table 2 Calculation of the contribution of the sediment phosphorous to the water body					
位置	地点	$J_s/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	水深 h/m	上覆水 $\text{PO}_4^{3-}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	贡献率 $a/\%$
干流	云阳	2.02	64.68	7.55	0.103
	磨刀溪	0.64	109.98	6.31	0.023
	奉节	0.15	65.56	6.24	0.009
	巴东	1.78	60.97	10.62	0.069
	郭家坝	-0.63	101.08	18.01	-0.009
	茅坪	1.60	109.85	7.01	0.052
支流	小江河口	-0.60	49.89	25.26	-0.012
	汤溪河口	2.17	69.75	13.76	0.056
	磨刀溪河口	0.62	68.32	5.86	0.038
	梅溪河口	2.47	70.16	5.85	0.150
	草堂河口	0.78	68.19	6.46	0.044
	大宁河口	0.78	47.38	6.56	0.062
	青岗河口	0.79	76.90	7.29	0.035
	渣溪河口	1.56	78.83	15.90	0.031
	童庄河口	0.52	88.20	5.26	0.028
山仔水库 ^[14]	日溪	153.30	10.80	50.50	5.700
	七里	159.87	16.80	46.00	4.200
	库心	171.55	20.00	45.10	3.860
	大坝	173.74	39.30	39.00	2.300
东风水库 ^[27]	—	—	—	—	2.800
乌江渡水库 ^[27]	—	—	—	—	4.200

1) “—”表示文献中没有相关数据

4 结论

(1) 三峡库区干流及支流河口上覆水 PO_4^{3-} -P 含量值域为 $5.25 \sim 25.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 孔隙水的含量值域为 $9.01 \sim 29.79 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 总体而言, 上覆水 PO_4^{3-} -P 含量较孔隙水低, 支流上覆水和孔隙水中 PO_4^{3-} -P 含量略高于干流.

(2) 郭家坝和小江河口沉积物为 PO_4^{3-} -P 的“汇”, 释放通量分别为 $-0.63 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $-0.60 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 其它区域的 PO_4^{3-} -P 均是由孔隙

水向上覆水进行扩散, 释放通量的范围为 $0.15 \sim 2.47 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 远小于滇池、太湖以及杜塘水库沉积物磷的释放通量. 干流 PO_4^{3-} -P 释放通量的最大值出现在云阳, 为 $2.02 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 最小值出现在奉节, 为 $0.15 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$; 支流释放通量的最大值出现在梅溪河口, 为 $2.47 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 最小值出现在童庄河口, 为 $0.52 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

(3) 由于三峡库区水体滞留时间较短, 水深较大, 库区内沉积物-水界面 PO_4^{3-} -P 的扩散对上覆水体的影响较小, 只有 $-0.011\% \sim 0.098\%$. 目前三峡

库区沉积物释磷作用还未对水质产生较大影响,但当水库的外部污染源得到控制以后,沉积物孔隙水和上覆水体的营养浓度差异将驱动沉积物内源营养负荷的释放。

参考文献:

- [1] 张晟,李崇明,付永川,等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 7-12.
- [2] 王海云. 三峡水库蓄水对香溪河水环境的影响及对策研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(2): 233-237.
- [3] 王颖,沈珍瑶,呼丽娟,等. 三峡水库主要支流沉积物的磷吸附/释放特性[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(8): 1654-1661.
- [4] 王丽香. 我国东部农村镇域水体环境氮磷污染及底泥对磷的吸附释放特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009. 6-10.
- [5] 李宝,丁士明,范成新,等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 114-120.
- [6] 王海军,王洪铸. 富营养化治理应放宽控氮、集中控磷[J]. 自然科学进展, 2009, **19**(6): 599-604.
- [7] 毛建忠,王雨春,赵琼美,等. 滇池沉积物内源磷释放初步研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(3): 229-233.
- [8] 李宝,范成新,丁士明,等. 滇池福保湾沉积物磷的形态及其与间隙水磷的关系[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 27-32.
- [9] 胡正峰,张磊,邱勤,等. 三峡库区长江干流和支流富营养化研究[J]. 山东农业科学, 2009, (12): 74-80.
- [10] 黎国有,肖尚斌,王雨春,等. 三峡水库干流沉积物的粒度分布与矿物组成特征[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, **34**(1): 9-13.
- [11] 国家环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 2011.
- [12] 王雨春,黄荣贵,万国江. SWB-1 型便携式湖泊沉积物-界面水取样器的研制[J]. 地质地球化学, 1998, (1): 94-96.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-250.
- [14] 苏玉萍,林佳,何灵,等. 福建省山仔水库沉积物磷对水体磷浓度贡献的估算[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 748-754.
- [15] Wang D S, Gao Z W, Du P F. Determination of diffusion coefficients in sandy sediments using resistivity techniques[C]. Bioinformatics and Biomedical Engineering-ICBBE, 2009. 1-3.
- [16] Ullman W J, Sandstrom M W. Dissolved nutrient fluxes from the nearshore sediments of Bowling Green Bay, central Great Barrier Reef Lagoon (Australia) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1987, **24**(3): 289-303.
- [17] Li Y H, Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1974, **38**(5): 703-714.
- [18] Krom M D, Berner R A. The diffusion coefficients of sulfate, ammonium, and phosphate ions in anoxic marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1980, **25**(2): 327-337.
- [19] 王雨春,万国江,黄荣贵,等. 湖泊现代化沉积物中磷的地球化学作用及环境效应[J]. 重庆环境科学, 2000, **22**(4): 39-41, 59.
- [20] 付长营,陶敏,方涛,等. 三峡水库香溪河库湾沉积物对磷的吸附特征研究[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 31-36.
- [21] 张润宇,王立英,吴丰昌,等. 太湖春季沉积物间隙水中磷的分布特征及界面释放的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 902-907.
- [22] 钟厚璋,苏玉萍,何灵,等. 杜塘水库春季沉积物内源磷的释放速率研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2010, **26**(6): 85-91.
- [23] 徐永辉,杨达源,陈可锋,等. 三峡水库蓄水后对库区岸坡地貌过程的影响[J]. 水土保持通报, 2006, **26**(5): 23-25, 35.
- [24] 国家环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 2006.
- [25] 肖铁岩,许晓毅,付永川,等. 三峡库区次级河流富营养化及其生态治理[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2009, **15**(1): 5-8.
- [26] Berner R A. Early diagenesis: A theoretical approach [M]. Princeton: Princeton University Press, 1980. 9-36.
- [27] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 423-428.
- [28] 吴丰昌,万国江. 泸沽湖沉积物-水界面扩散作用对上覆水体基本化学组成的影响[J]. 环境科学, 1996, **17**(1): 10-13.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行